

原著論文

ニホンジカの個体群動態の推定と将来予測 (兵庫県本州部 2012 年)

松本 崇^{1,2*#}・岸本康誉^{1,2###}・太田海香³・坂田宏志^{1,2}

¹兵庫県森林動物研究センター・²兵庫県立大学自然・環境科学研究所・³横浜国立大学

要 点

- ・1999年から2011年までに入手されたデータから、兵庫県本州部のニホンジカの自然増加率や個体数を、階層ベイズモデルを構築し、マルコフ連鎖モンテカルロ法によって推定した。
- ・推定は、銃猟時の目撃効率、糞塊密度、狩猟捕獲数、有害捕獲数のデータを基に、それぞれのデータの誤差変動を組み込んだモデル（坂田ほか2012）を改良して用いた。
- ・改良点は以下の3点である。
- ・増加率には密度効果を導入するとともに、毎年異なった値を推定した。また、その変動を考慮して将来予測をおこなった。
- ・狩猟と有害捕獲による捕獲率は、県の捕獲に関する施策が強化された2010年以後と2009年以前は異なる率を推定した。
- ・目撃効率と生息密度の係数に関しては、出猟カレンダーの報告内容を変更した2002年以後と2001年以前は異なるものとして推定した。
- ・自然増加率の中央値は、もっとも低い年（2003年）で12.8%、もっとも高い年（2001年）で22.3%、と推定された。
- ・推定個体数は、2010年に比べ若干減少し、2011年末の段階で中央値で130,803頭（90%信頼限界では90,633～212,491頭程度）と推定された。
- ・さらに、3通りの捕獲計画（今後、継続的に毎年3万頭捕獲、3万5千頭捕獲、4万頭捕獲）に基づく個体数の将来予測の結果、中央値で見ると、いずれの捕獲計画においても、個体数は減少すると予測された。しかし、90%信頼区間でみると3万頭捕獲、および3万5千頭捕獲の場合、増加する可能性もあると予測された。

key words : 個体数管理 自然増加率 ベイズ推定 マルコフ連鎖モンテカルロ法 個体数推定

* 連絡先 : 〒669-3842 兵庫県丹波市青垣町沢野940 兵庫県森林動物研究センター

e-mail: taka4matu@gmail.com

#現所属 : (株)野生鳥獣対策連携センター

現所属 : (株)野生動物保護管理事務所

1. はじめに

この論文では、兵庫県本州部におけるニホンジカ *Cervus nippon*(以下、シカ) の保全と管理の意思決定に資するため、自然増加率や生息個体数などの推定を行う。さらに、目標捕獲数を設定する際の判断材料を提供するために、目標捕獲数の異なる複数通りのシナリオを設定し、それぞれのシナリオに基づくシカの将来的な個体数の変動を予測した。

推定には、兵庫県で体系的に収集している 1999 年から 2011 年までのデータを用いる。具体的には、兵庫県森林動物研究センターが行っている、尾根上の 1km 当たりのシカの糞塊数（糞塊密度）と狩猟登録者の報告に基づく銃猟時の平均目撃数（目撃効率）、狩猟による捕獲数、有害による捕獲数である。

自然増加率や個体数の推定は、上記のデータとの時系列的な関係を記述する階層ベイズモデルを構築し、マルコフ連鎖モンテカルロ法によって推定する。これらのモデルの中では、自然増加率や個体数のほか、観測データと個体数、または密度との比率を表す係数に加え、複数の観測データに含まれる誤差変動を明示的に組み込んだ上で、その誤差の大きさも推定する。これらの手法は、兵庫県（坂田ほか 2012）や島根県、全国（環境省自然環境局生物多様性センター 2011）のニホンジカの個体数推定に適用されており、本稿では、それを改良したモデルを用いて推定する。

モデルの主な改良点は以下の 3 点である。1) 増加率には密度効果を導入するとともに、毎年異なった値を推定した、2) 狩猟と有害捕獲による捕獲率は、県の捕獲に関する施策が強化された 2010 年以降と 2009 年以前は異なる率を推定した、3) 目撃効率と生息密度の係数は、出猟カレンダーの報告内容を変更した 2002 年以降と 2001 年以前は異なるものとして推定した。

2. 方法

対象とする期間と地域

対象期間は 1999 年から 2011 年までの 13 年間、対象地域は兵庫県本州部とする。生息密度の指標の一つである糞塊密度の調査を行っているのが年末のため、生息数も年末の値を推定する。したがって分析に際しては、年度ではなく 1 月から 12 月までで年を区切る。

用いたデータ

推定には、次にあげるデータを用いた。

有害捕獲数（年度） $i_yugai[i]$: i 年度の有害捕獲許可による捕獲数。銃猟とわな猟の合計値を生息数の動向を反映する指標として用いる。 $i=1999, 2000, \dots, 2010, 2011$ 。

糞塊密度 $fun_d[i]$: i 年度の 10 月下旬から 11 月上旬に所定のラインセンサスにより確認した 1km あたりの平均糞塊数。生息密度の動向を反映する指標として用いる。
 $i=1999, 2000, \dots, 2010, 2011$ 。

目撃効率 $spue[i]$: i 年度に狩猟登録者から得られた銃猟による狩猟時の目撃効率。生息密度の動向を反映する指標として用いる。 $i=1999, 2000, \dots, 2010, 2011$ 。

狩猟捕獲数 $r_ca[i]$: i 年度の狩猟による捕獲数。銃猟とわな猟の合計値を生息数の動向を反

映する指標として用いる。狩猟捕獲数は年度単位で集計される。狩猟期間は 11 月 15 日から 3 月 15 日までのため、本論文では、 i 年度に狩猟で捕獲されたシカは、全て $i+1$ 年に捕獲されたとみなして、年度単位のデータを年単位のデータに変換し推定に用いた。

$i=1999,2000,\dots,2010,2011$ 。

有害捕獲数 (年) $y_ca[i]$: i 年度の 1 月から $i+1$ 年度の 12 月までの有害捕獲許可による捕獲数。 $i=1999,2000,\dots,2010$ 。

森林面積 f_area : 兵庫県本州部の森林面積。生息密度の期待値を計算する際に用いる。

以上の方法で収集したデータを表 1 に示す。

表 1 用いたデータ

年	有害捕獲(年度) i_yugai	糞塊密度 fun_d	目撃効率 $spue$	狩猟捕獲数(年) r_ca	有害捕獲数(次年) y_ca	森林面積 f_area
1999	1948	11.24	2.10	6335	2357	5362.74
2000	2391	12.92	2.12	7200	2666	5362.74
2001	2871	13.91	2.20	6847	3337	5362.74
2002	3417	17.42	1.80	7768	3620	5362.74
2003	3490	13.20	1.97	8966	3793	5362.74
2004	4093	14.06	1.90	8270	4633	5362.74
2005	4904	16.06	2.26	9217	5455	5362.74
2006	5295	18.22	1.97	9556	6185	5362.74
2007	6414	15.71	1.78	9657	7969	5362.74
2008	8022	19.34	1.76	10811	9345	5362.74
2009	8187	20.02	1.70	11394	15262	5362.74
2010	17138	25.66	2.13	26130	14289	5362.74
2011	12403	19.79	1.91	22854		5362.74

推定する変数

以下の考え方に基づいて、 $lire[i]$ 、 lnk 、 $pr[t]$ 、 $py[t]$ 、 $lr_spue[t]$ 、 lr_fun 、 $lnNins$ 、 v_spue 、 v_fun 、 v_ryo 、 v_yugai (ここで $i=1999,2000,\dots,2010$ 、 $t=1,2$) の計 25 変数について事前分布を設定して推定し、目的である自然増加率や個体数を推定する。推定変数の初期値と事前分布は表 2 のとおりである。各推定変数の定義と事前分布を設定する際の考え方は、以下のとおりである。

1. 内的自然増加率の自然対数値 $lire[i]$: 毎年異なった値を推定した。事前分布は、環境省の特定哺乳類生息動向調査の個体数推定 (環境省生物多様性センター 2011) に採用された分布を用いる。また、 $\exp(lire)$ を内的自然増加率 ire とする。
2. 環境収容力の自然対数値 lnk : 環境収容力 $k=\exp(lnk)$ とし、 k の期待値が 100、分散が 1 の対数正規分布を事前分布とした。文献データからは 118 頭/km(知床半島)、あるいは 72 頭/km(金華山) で個体数の急激な減少が観測されている (Ito 1986, Kaji et al 2004)。

この事前分布の 90%限界は 11.6 頭/km~315.8 頭/km で広めの範囲を取るようにした。

3. 生息密度と目撃効率の比率を示す係数(目撃係数)の自然対数値 $lr_spue[t]$: 事前分布は正規分布を仮定し、事前の情報は十分でないため、その分散は大きめに設定した。データの前になる出猟カレンダーによる報告内容が、シカに関する項目のみであった 2001 年以前と、イノシシに関する項目も含められるようになった 2002 年以降では、報告者の構成や出猟回数や場所等が異なるため、2001 年以前と 2002 年以降の 2 区間に分けて係数を推定することとした。目撃効率と生息密度の係数 rs は $\exp(lr_spue)$ をとする。
4. 生息密度と糞塊密度の比率を示す係数の自然対数値 lr_fun : 事前分布は正規分布を仮定し、事前の情報は十分でないため、その分散は大きめに設定した。糞塊密度調査の手法は毎年変わらないため、係数自体は毎年変動しないと仮定し、観測モデルにおいて観測誤差を想定するだけにした。生息密度と糞塊密度の比率を示す係数 rf は $\exp(lr_fun)$ とする。
5. 狩猟による捕獲率(狩猟捕獲率) $pr [t]$: 狩猟による捕獲数の生息個体数に対する比率
兵庫県のシカの捕獲に関する施策が強化され狩猟による捕獲に報償費が出されるようになった 2010 年以降と 2009 年以前では異なる捕獲率を推定した。 pr については事前情報がないため、事前分布は形状母数 $\alpha=1$ 、形状母数 $\beta=1$ のベータ分布に設定した。
6. 狩猟により捕獲された個体を除いた個体数に対する有害捕獲による捕獲率 $pry[t]$: 有害捕獲の捕獲率は、

$$py[t]=(1-pr[t])\times pry[t]$$
 となる。また、兵庫県のシカの捕獲に関する施策が強化され、有害捕獲に関する目標が大きく変更された 2010 年以降と 2009 年以前では異なる捕獲率を推定した。 pry については事前情報がないため、事前分布は形状母数 $\alpha=1$ 、形状母数 $\beta=1$ のベータ分布に設定した。
7. 1 年前 (2010 年) の生息個体数の自然対数値 $\ln Nins$: 事前分布は正規分布とし、平均値は、昨年に推定した個体数の事後分布の平均値の対数値を用いた。分散は、分布の 95% 信頼限界が、既存の情報から考えられるおおよその限界値になる値を設定した。具体的には、2010 年の狩猟期間に捕獲された個体数、および有害捕獲による捕獲数はそれぞれ 26,130 頭、15,262 頭であるので、生息数は捕獲数を合計した 41,392 頭以下を下限にすれば十分であると考え、95%信頼限界の下限が 38,337 頭となる分散 0.5 とした。95%信頼限界の上限は 612,949 頭となるが、現実的に想定できる値を十分にカバーすると考えられる。1999 年から 2010 年までのデータは前回の推定と今回の推定とで 2 回用いることになってしまう。しかし、前回の推定値と著しく異なる値を公表することは関係者間での合意形成に著しく妨げとなる。したがって、行政機関が公表する個体数推定値としては推定値が前回と著しくずれないようにする方法として、前回の推定値の平均を事前分布の平均として用いた。事前分布の分散は十分に広げ、データが完全に二度使いにならないようにした。
8. 目撃効率、糞塊密度、狩猟捕獲数、有害捕獲数の期待値からの誤差分散 v_spue 、 v_fun 、 v_ryo 、 v_yugai : それぞれ、観測モデルで示す確率分布の誤差分散として観測データか

ら推定する。これらの誤差分散の事前分布は、それぞれ、形状母数、尺度母数ともに 0.01 の逆ガンマ分布を用いた。

9. 各推定変数の初期値は、事前分布の期待値とした。尤度関数の変動部分 v_spue 、 v_fun 、 v_ryo 、 v_yugai については、それぞれ初期値を 0.01 とした。

表2 推定した係数とその初期値、および事前分布

推定変数	ブロック	初期値	事前分布
lire[i]	1	0.1789	正規分布 (ln(1.2)-0.5*0.006826535, 0.006826535)
lnk	1	4.1052	正規分布 (ln(100)-0.5*1, 1)
lr_spue[t]	1	-2.3026	正規分布 (ln(0.1), 5)
lr_fun	1	0.0000	正規分布 (ln(1), 5)
pr[t]	1	0.5000	ベータ分布 (1, 1)
pry[t]	1	0.5000	ベータ分布 (1, 1)
lnNins	1	11.9401	正規分布 (11.94010712, 0.5)
v_spue	2	0.0100	逆ガンマ分布 (0.01, 0.01)
v_fun	2	0.0100	逆ガンマ分布 (0.01, 0.01)
v_ryo	2	0.0100	逆ガンマ分布 (0.01, 0.01)
v_yugai	2	0.0100	逆ガンマ分布 (0.01, 0.01)

事前分布の引数は、正規分布 (期待値、分散)、逆ガンマ分布 (形状母数、尺度母数)、ベータ分布 (形状母数 α 、形状母数 β) を示す。

個体群動態の過程モデル

個体群動態の過程モデルは Beverton-Holt モデルを採用した。生息個体数は 2010 年を起点として、

翌年の 2011 年まで個体数を

$$\begin{aligned} \beta[i] &= (\text{ire}[i] - 1) / (k * f_area) \\ N[i+1] &= (\text{ire}[i] * N[i] / (1 + \beta[i] * N[i])) - \text{caa}[i] \\ & \quad (i=2010 \text{ のとき}) \end{aligned}$$

1999 年までの個体数を

$$\begin{aligned} \beta[i-1] &= (\text{ire}[i-1] - 1) / (k * f_area) \\ N[i-1] &= (\text{caa}[i-1] + N[i]) / (\text{ire}[i-1] - \beta[i-1] * (\text{caa}[i-1] + N[i])) \\ & \quad (i=2010, 2009, \dots, 2000 \text{ のとき}) \end{aligned}$$

のように計算する。

ここで、 $N[i]$ は、 i 年の生息個体数を示す。また、 $\text{caa}[i]$ は、 i 年の捕獲数であり、狩猟捕獲数 $r_ca[i]$ と有害捕獲数 $y_ca[i]$ の合計値である。

2010 年の個体数は $N[2010] = \text{round}(\exp(\ln Nins))$ とした。なお、生息個体数は、年末時点での個体数を想定している。

観測モデル

推定する個体数と観測されたデータとの関係を示す観測モデルは以下のとおりとする。

1. 目撃効率に関する観測モデル

$$\log(\text{SPUE}[i]) = \log(\text{rs} \times \text{N}[i] / \text{f_area}) - 0.5 \times \text{v_spue} + \text{e_spue}[i]$$

$i=1999, 2000, \dots, 2010, 2011$

2. 糞塊密度に関する観測モデル

$$\log(\text{fun}[i]) = \log(\text{rf} \times \text{N}[i] / \text{f_area}) - 0.5 \times \text{v_fun} + \text{e_fun}[i]$$

$i=1999, 2000, \dots, 2010, 2011$

3. 狩猟捕獲数に関する観測モデル

$$\log(\text{r_ca}[i]) = \log(\text{pr}[i] \times \text{N}[i]) - 0.5 \times \text{v_ryo} + \text{e_ryo}[i]$$

$i=1999, 2000, \dots, 2010, 2011$

4. 有害捕獲数に関する観測モデル

$$\log(\text{i_yugai}[i]) = \log(\text{py}[i] \times \text{N}[i]) - 0.5 \times \text{v_yugai} + \text{e_yugai}[i]$$

$i=1999, 2000, \dots, 2010, 2011$

$\text{e_spue}[i]$ 、 $\text{e_fun}[i]$ 、 $\text{e_ryo}[i]$ 、 $\text{e_yugai}[i]$ は、誤差変動を示し、それぞれ期待値 0、分散が v_spue 、 v_fun 、 v_ryo 、 v_yugai の正規分布に従うものとする。

将来予測

個体数の将来予測は、推定された変数の事後分布を用いて以下の 3 通りの捕獲計画に基づいて 2018 年までの個体数を予測した。いずれの捕獲計画においても、2011 年、および 2012 年の捕獲数は、34,000 頭、および 30,000 頭とした。2013 年以降、毎年 1) 30,000 頭、2) 35,000 頭、および 3) 40,000 頭を捕獲した場合の個体数の予測を行った。

マルコフ連鎖モンテカルロ法

これまで述べたデータとモデルおよび事前分布の設定にもとづいて、マルコフ連鎖モンテカルロ法 (Gilks *et al.* 1996) による推定を行った。この推定は SAS/STAT9.3 の MCMC Procedure を用いた (SAS Institute Inc. 2011)。

サンプリング

推定変数を表 2 のとおり 2 つのブロックに分けて、メトロポリス法による独立サンプラーを用いて事後分布をサンプリングした。サンプリング回数については、最初の 100 万回はサンプリングせず、次の 1000 万回のうち 1,000 回に 1 回サンプリングし、計 1 万回のサンプリングを行った。

提案分布は、正規分布とし、実際のサンプリング回数に合わせて 5 万回のサンプリングによる事後分布にもとづいて、Robertset *al.* (1997) の示した最適な採択率 23.4% を目標に $\pm 7.5\%$ の範囲の採択率になるように、スケールと共分散行列のチューニングを行った。

収束判定

収束判定は、有効サンプルサイズ (Kass *et al.* 1998) と Geweke 検定 (Geweke 1992) の 2 つの基準で確認した。有効サンプルサイズによる判定では、これが 1,000 以上であることを基準とした。Geweke 法では、サンプリングされたデータのうち、最初の 1,000 回と最後の 5,000 回の期待値の差を検定し、棄却水準が 0.01 にならないことを基準とした。

3. 結果

収束

いずれの推定変数においてもサンプリングの際の自己相関はほとんどなく、有効サンプル数は 5,000 を超え、良好なサンプリングができたと判断された。Geweke 検定では、すべての推定変数において基準を上回り収束していると判断された。

推定値

事前分布と事後分布の形状を図 1 に、得られたデータの観測値と期待値との関係を図 2 に示した。推定値の要約は表 3 の通りであった。個体数の年次変動パターンを図 3 に、増加個体数の年次変動パターンを図 4 に示した。3 通りの捕獲計画（毎年 30,000 頭、35,000 頭、40,000 頭捕獲）に基づく個体数の将来予測を図 5 に、増加個体数の将来予測を図 6 に示した。

内的自然増加率以外のすべての変数では、事後分布の幅は事前分布の幅より狭まった（図 1-2~1-10）。しかし、内的自然増加率では、事前分布の幅と事後分布の幅はほとんど変わらず、事前分布の設定が推定に影響を与えていた（図 1-1）。

兵庫県本州部に生息するシカの個体数の中央値は、2011 年は 130,803 頭（90%信頼限界で 90,633 頭~212,491 頭）と 2010 年の個体数の中央値（148,672 頭）に比べおよそ 18,000 頭減少したと推定された（表 3-1, 図 3）。

自然増加率の中央値は、1.1280~1.2230 までの値をとった（表 3-3）。

目撃係数の中央値は、2001 年以前は 0.1310、2002 年以降は 0.0831 と推定された（表 3-4）。

環境収容力は中央値で 164.4 頭/km² と推定された（表 3-4）。

狩猟捕獲率の中央値は、2009 年以前は 0.0774、2010 年以降は 0.1760、有害捕獲率の中央値は、2009 年以前は 0.0400、2010 年以降は 0.1150 となった（表 3-4）。

個体数の将来予測に関しては、中央値でみるといずれの捕獲計画においても、個体数は減少すると予測された（表 3-5、図 5）。毎年 30,000 頭捕獲する場合、2018 年の予測個体数は、2011 年のおよそ 3 分の 1 の 47,590 頭に、毎年 35,000 頭捕獲する場合は、2011 年の 10 分の 1 以下の 12,114 頭に、毎年 40,000 頭捕獲する場合は、2018 年の個体数の中央値は 0 頭となった（表 3-5、図 5）。ただし、いずれの場合でも信頼幅は広く、90%信頼区間でみると、3 万頭捕獲、および 3 万 5 千頭捕獲の場合、増加する可能性もあると予測された。

4. 考察

兵庫県本州部におけるシカの個体数は近年単調増加していた（坂田ほか 2012）。しかし、2011 年末のシカの個体数は、2010 年末に比べ初めて減少したことが示された。この個体数減少は、2010 年からの捕獲に関する施策の推進に伴う捕獲数増加の効果が現れたと考えられる。2011 年の増加個体数の中央値は 22,650 頭であり、2012 年以降も年間 30,000 頭以上捕獲し続ければ、予測個体数の中央値でみる限り個体数は今後も減少し続けると予測される。しかし、90%信頼区間でみると、3 万頭捕獲、および 3 万 5 千頭捕獲の場合、増加する可能性もあり注意が必要である。

狩猟・有害による捕獲率に関しては、捕獲が強化された 2010 年以降と 2009 年以前、目撃係数に関しては、シカに加えイノシシの目撃数も報告するようになった 2002 年以降と 2001 年以前とで異なるものとして推定した。2010 年以降の捕獲率の中央値は、有害・狩猟ともに 2009 年以前の中央値の 2 倍以上と推定された。2002 年以降の目撃係数の中央値は、2001 年以前の中央値に比べ 3 分の 2 以下と大きく異なり、異なるものとして推定したことの妥当性が示された。このように、捕獲目標や報告様式の変更など環境要因の変化により変数の値が異なると予想されるならば、環境要因の変化前後で別の変数として推定する必要がある。本来これらの変数は、環境要因の変化前後だけでなく毎年変動するものである。しかし、ベイズ推定において、データに比して推定する変数を増やしすぎるとモデルが収束しにくくなる。したがって、本推定においては毎年変化する変数としてではなく、環境要因の変化の前後のみで変化するとして推定する方法が適していると考えられる。

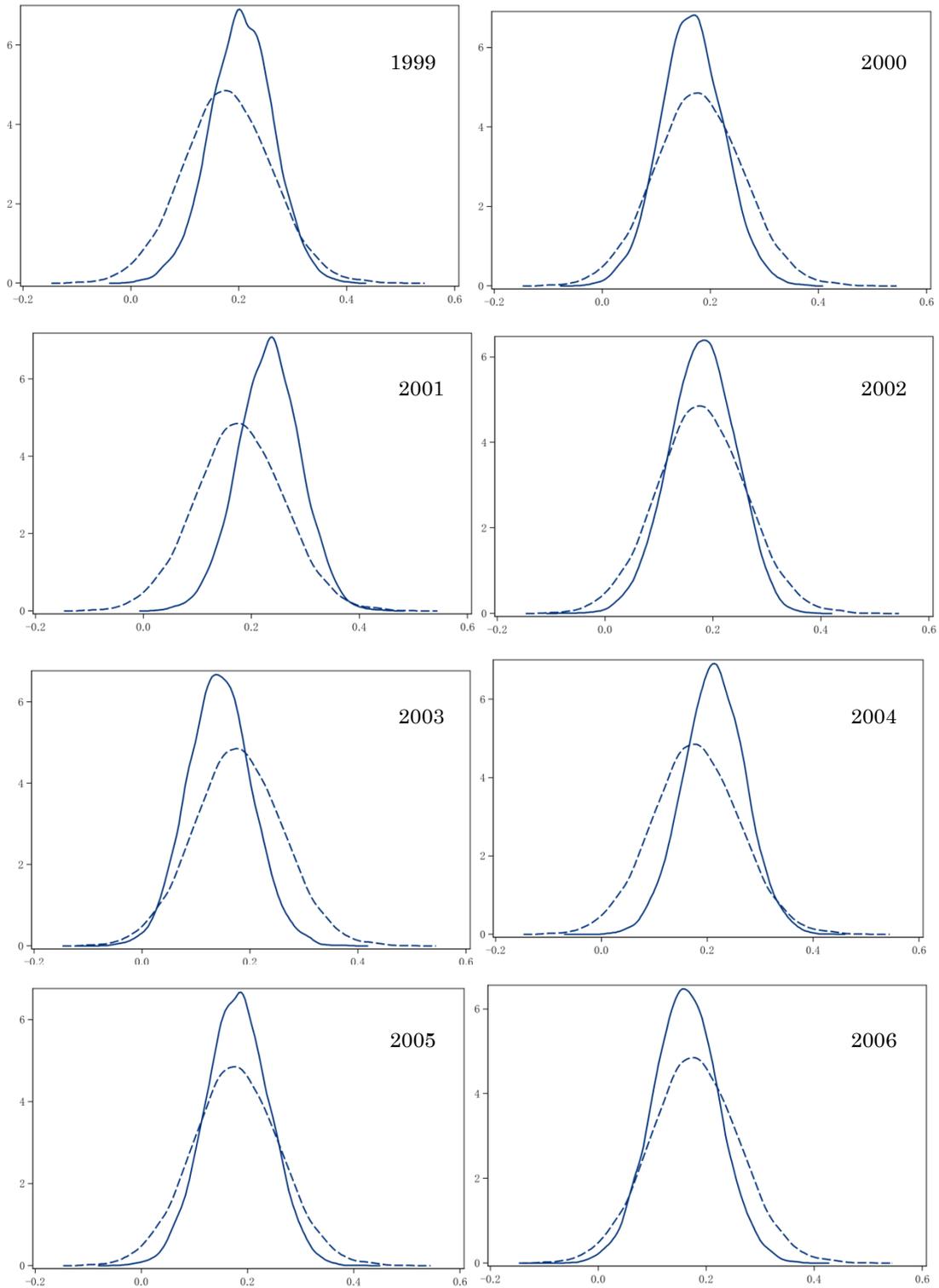


図 1 - 1 内的自然増加率 (log) の事前分布 (破線) と事後分布 (実線 ; 次頁へ続く)

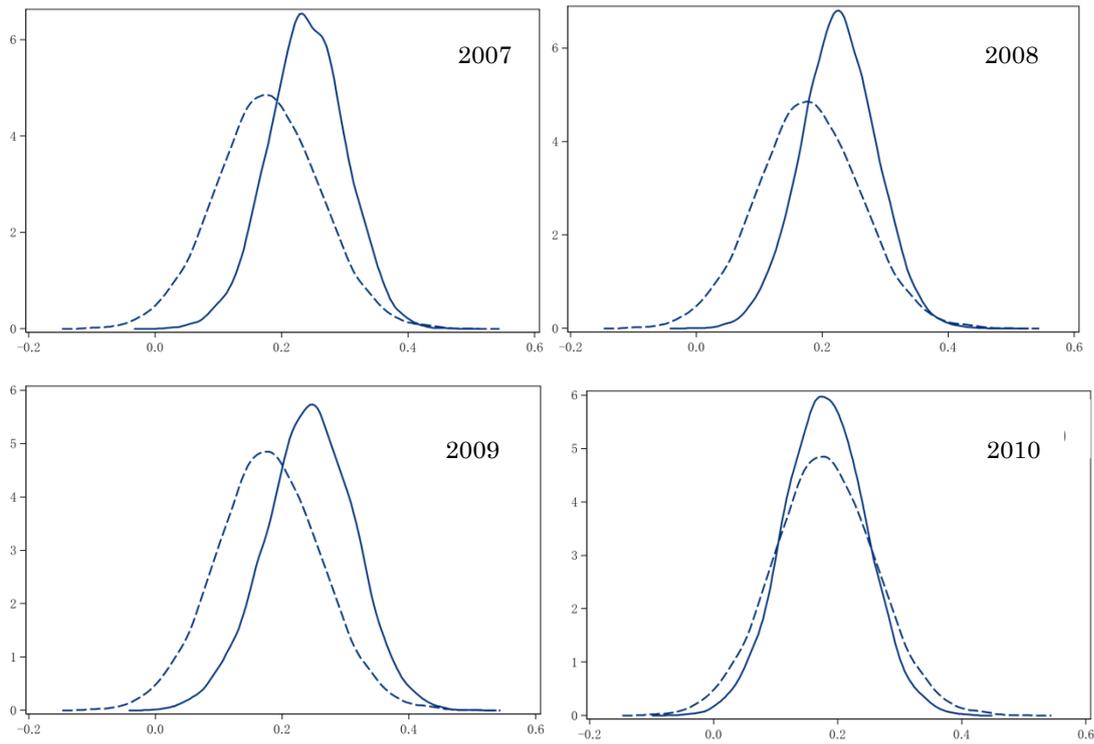


図 1 - 1 内的自然増加率 (log) の事前分布 (破線) と事後分布 (実線 ; 次頁からの続き)

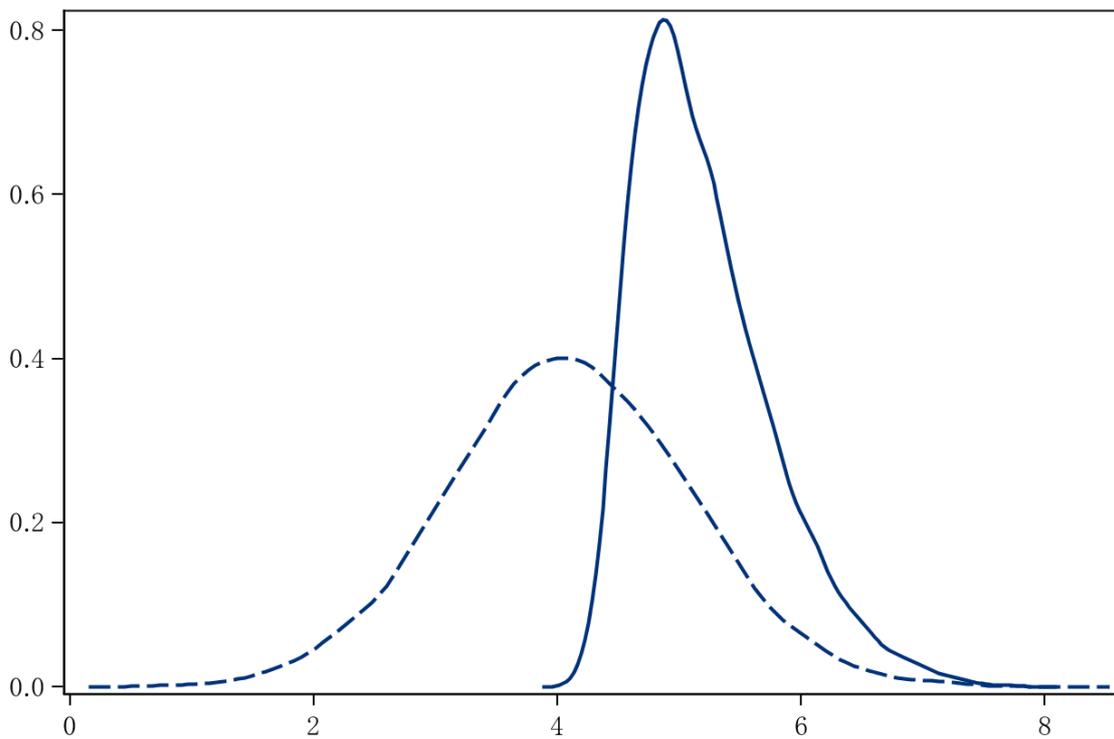


図 1 - 2 環境収容力 (log) の事前分布 (破線) と事後分布 (実線)

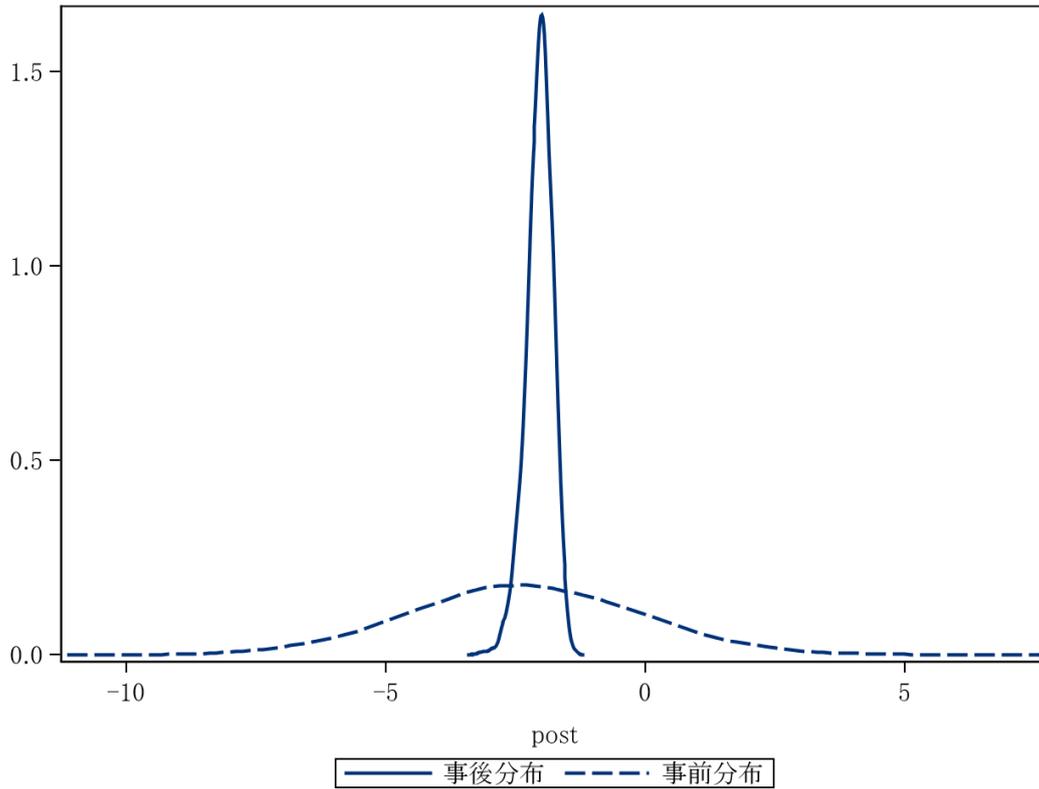


図 1 - 3 2001 年以前の生息密度と目撃効率の比率を示す係数 (log) の事前分布 (破線) と事後分布 (実線)

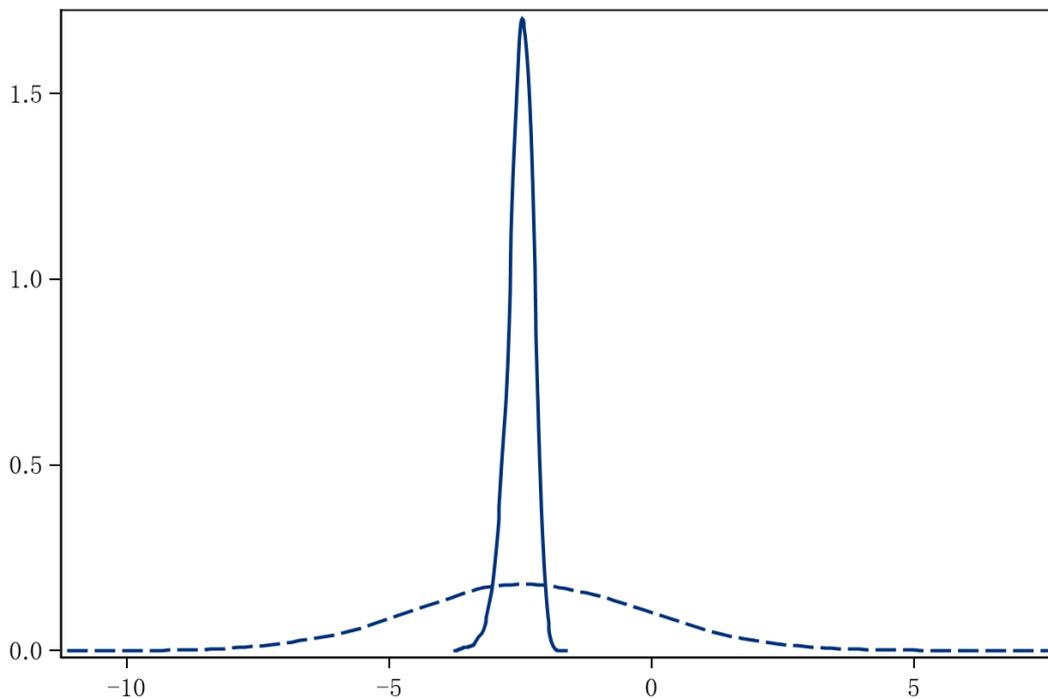


図 1 - 4 2002 年以降の生息密度と目撃効率の比率を示す係数 (log) の事前分布 (破線) と事後分布 (実線)

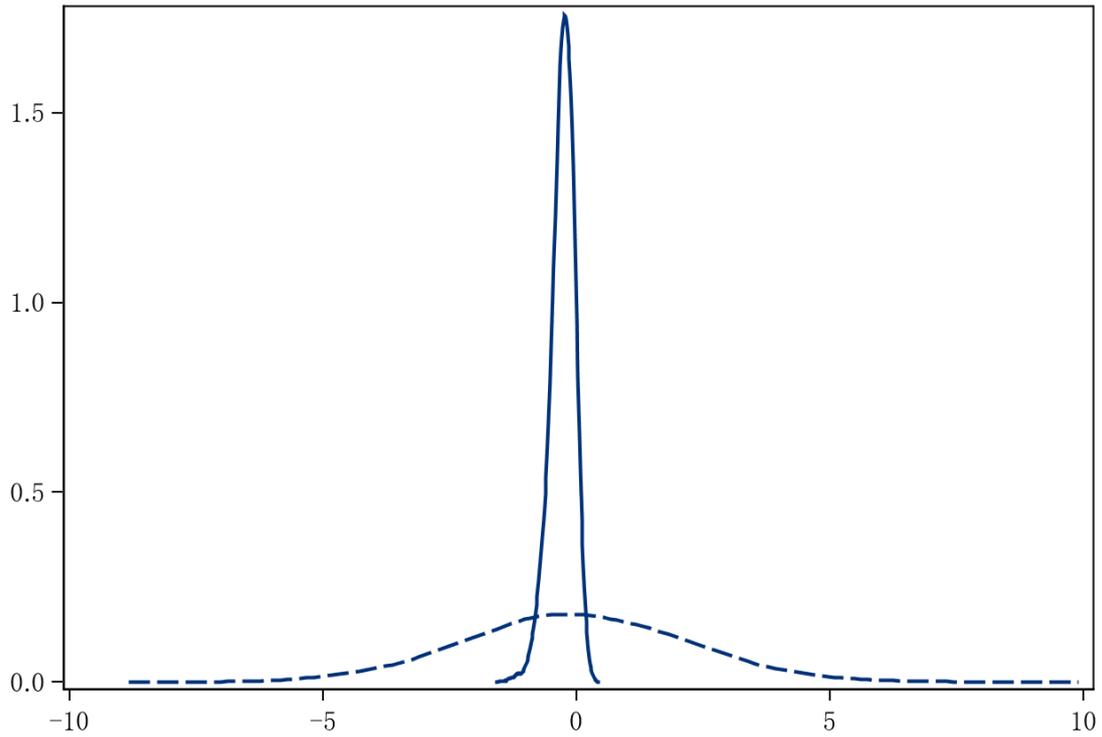


図 1 - 5 生息密度と糞塊密度の比率を示す係数(log) の事前分布(破線)と事後分布(実線)

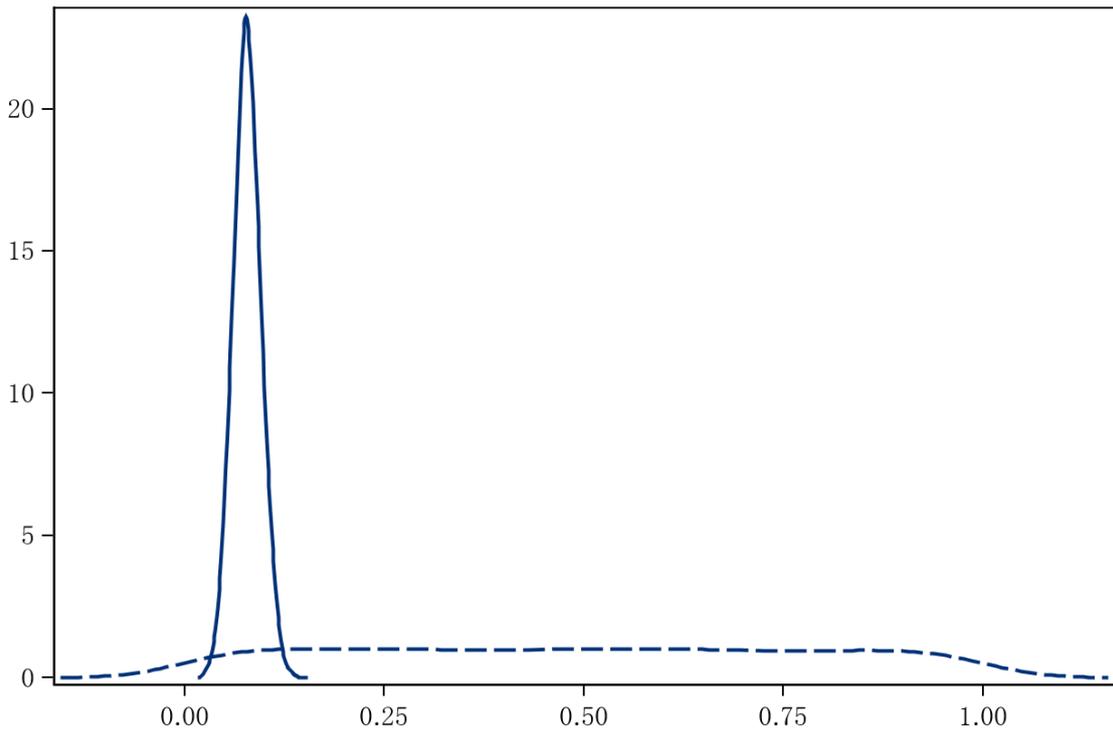


図 1 - 6 2009 年以前の狩猟による捕獲率の事前分布(破線)と事後分布(実線)

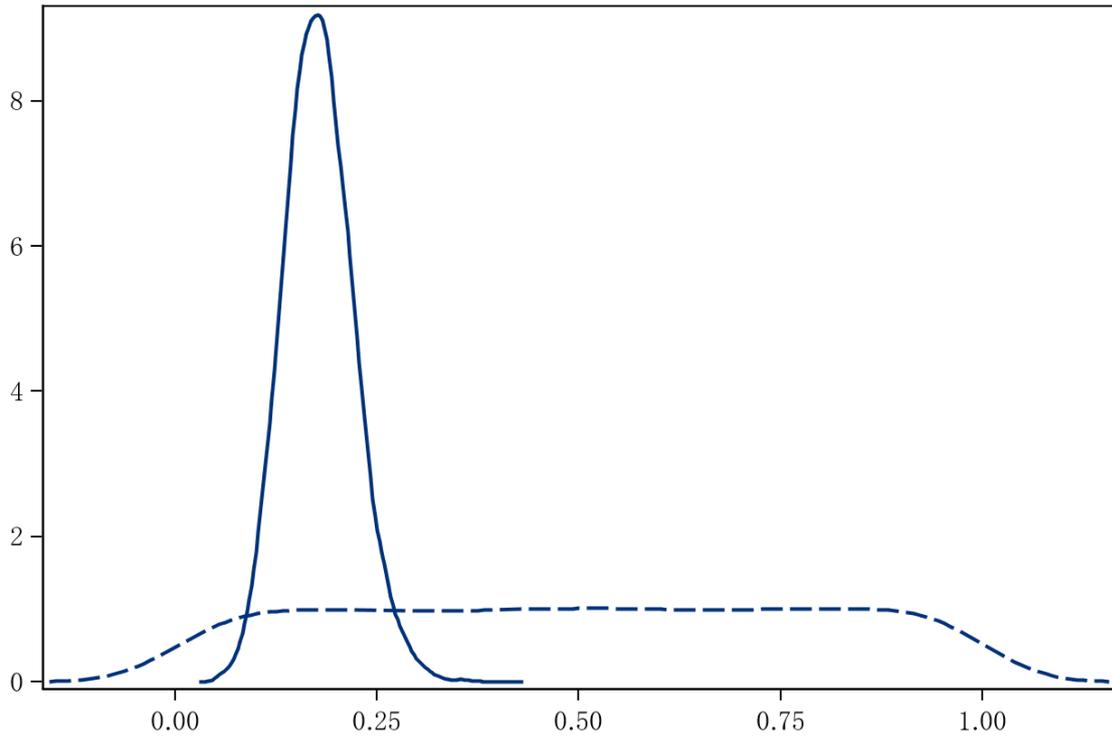


図 1-7 2010 年以降の狩猟による捕獲率の事前分布(破線)と事後分布(実線)

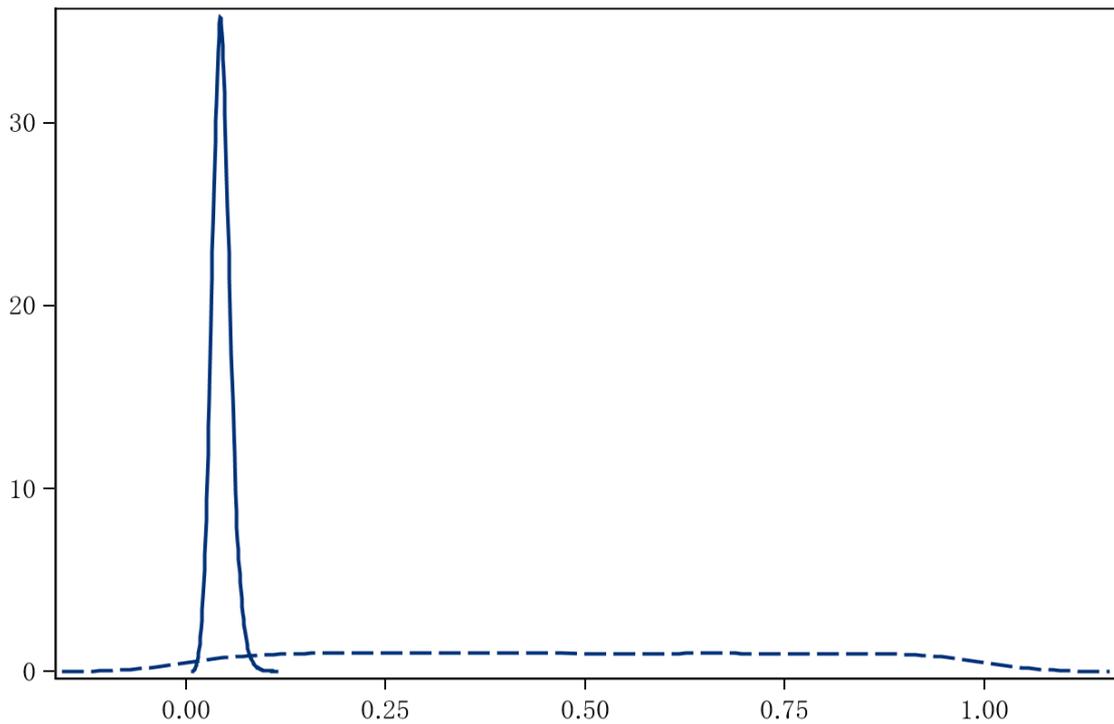


図 1-8 2009 年以前の有害による捕獲率の事前分布(破線)と事後分布(実線)

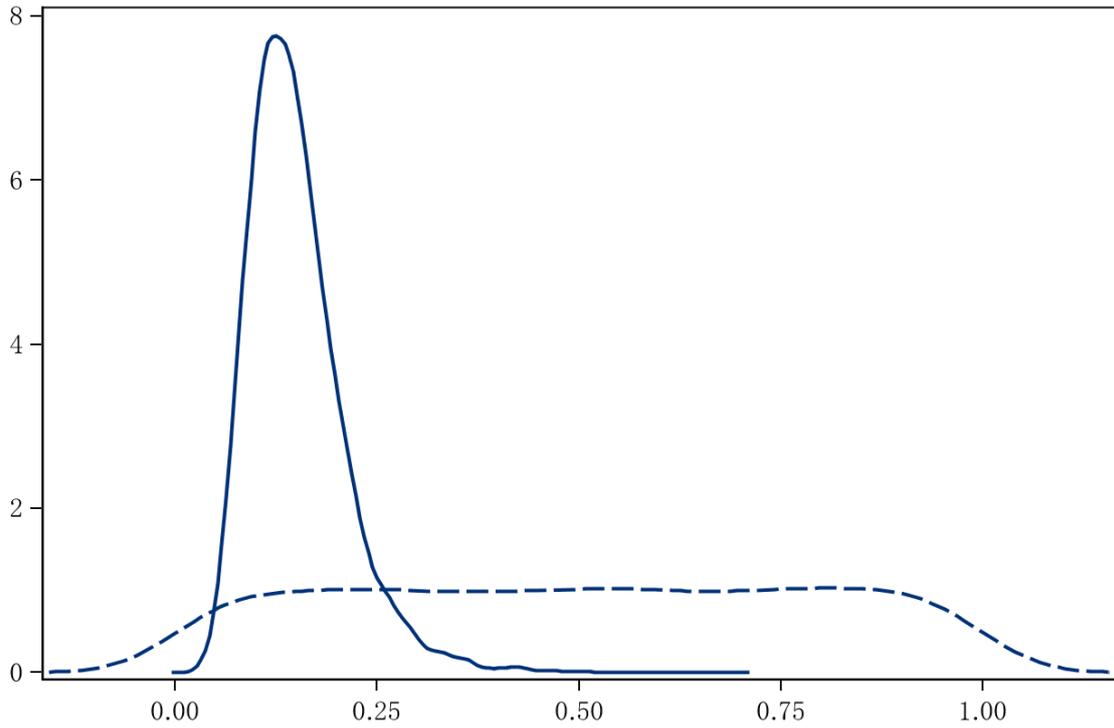


図 1-9 2010 年以降の有害による捕獲率の事前分布(破線)と事後分布(実線)

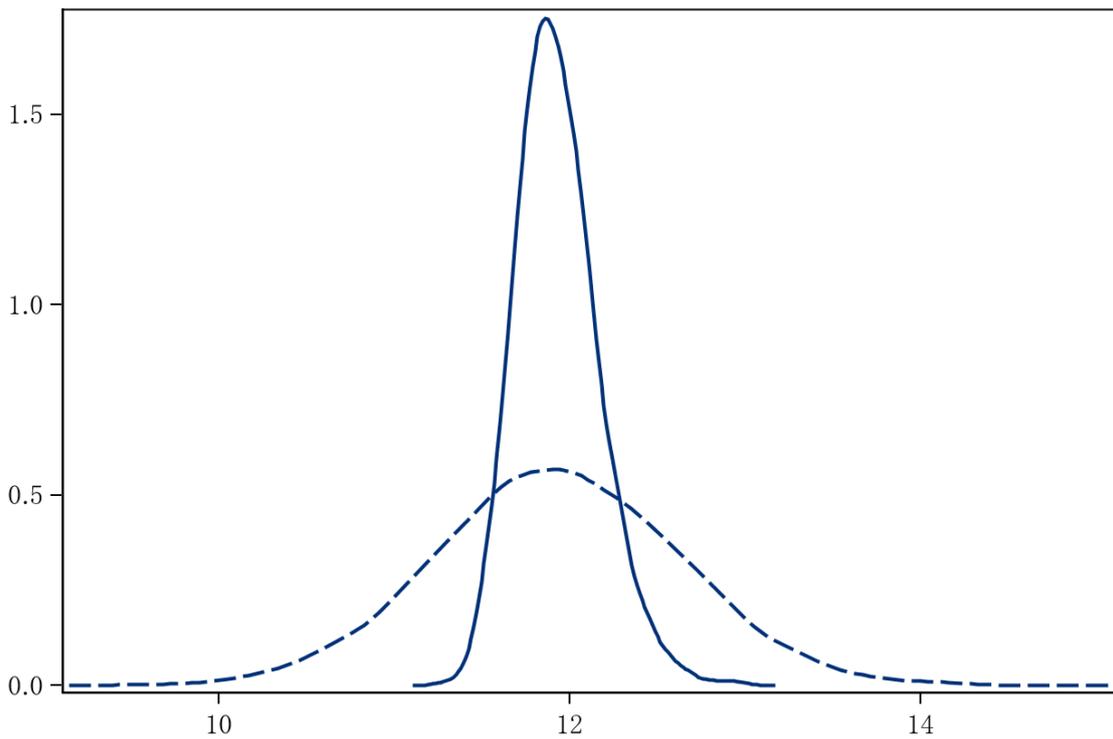


図 1-10 1 年前(2010)年の生息個体数(log)の事前分布(破線)と事後分布(実線)

推定値の要約

表 3 - 1 個体数の推定値の要約

変数	平均	標準偏差	5 %点	25 %点	50 %点	75 %点	95 %点
個体数 1999	86210	23042	58898	70873	81749	96045	128487
個体数 2000	94156	25099	64284	77198	89429	104841	140660
個体数 2001	98530	26643	66984	80769	93210	109450	147538
個体数 2002	109684	29138	75043	90145	104213	122016	163909
個体数 2003	115858	30993	79161	95194	109985	128975	173885
個体数 2004	117539	32106	80017	95960	111175	131468	177475
個体数 2005	126823	34007	86477	104074	120080	141258	190287
個体数 2006	131850	35245	89940	108245	124974	147134	195555
個体数 2007	134158	36537	91375	109770	126960	149825	200982
個体数 2008	144429	38454	99263	118593	136975	161141	215119
個体数 2009	151861	39798	104306	125058	144107	169306	224137
個体数 2010	156352	40607	106602	128605	148672	174976	230556
個体数 2011	138642	40143	90633	111596	130803	156537	212491

表 3 - 2 増加個体数の推定値の要約

変数	平均	標準偏差	5 %点	25 %点	50 %点	75 %点	95 %点
増加個体数 1999	16638	5249	8817	13098	16318	19736	25669
増加個体数 2000	14241	5271	6258	10758	13882	17341	23250
増加個体数 2001	21337	5894	12643	17383	20892	24795	31566
増加個体数 2002	17563	6210	7804	13452	17418	21360	27803
増加個体数 2003	14440	6018	5237	10494	14145	18133	24534
増加個体数 2004	22187	6302	12498	17998	21829	25983	32989
増加個体数 2005	19699	6500	9467	15418	19560	23713	30617
増加個体数 2006	18050	6723	7429	13730	17876	22165	29232
増加個体数 2007	27896	7132	16642	23197	27555	32396	39926
増加個体数 2008	27588	7198	16094	22865	27401	32116	39542
増加個体数 2009	31147	9238	16159	24951	30971	37073	46682
増加個体数 2010	22710	7747	9902	17870	22739	27702	35008
増加個体数 2011	23402	9241	9106	17528	22831	28741	39069

表 3-3 自然増加率の推定値の要約

変数	平均	標準偏差	5 %点	25 %点	50 %点	75 %点	95 %点
自然増加率 1999	1.2005	0.0649	1.0962	1.1560	1.1986	1.2425	1.3112
自然増加率 2000	1.1581	0.0614	1.0639	1.1161	1.1550	1.1972	1.2629
自然増加率 2001	1.2253	0.0660	1.1201	1.1795	1.2230	1.2684	1.3381
自然増加率 2002	1.1673	0.0628	1.0665	1.1241	1.1654	1.2092	1.2729
自然増加率 2003	1.1313	0.0586	1.0404	1.0911	1.1280	1.1685	1.2322
自然増加率 2004	1.1979	0.0637	1.0972	1.1543	1.1959	1.2382	1.3062
自然増加率 2005	1.1637	0.0614	1.0669	1.1212	1.1607	1.2035	1.2686
自然増加率 2006	1.1444	0.0595	1.0514	1.1028	1.1422	1.1829	1.2452
自然増加率 2007	1.2187	0.0678	1.1116	1.1726	1.2149	1.2637	1.3350
自然増加率 2008	1.2012	0.0649	1.1000	1.1560	1.1989	1.2433	1.3121
自然増加率 2009	1.2172	0.0791	1.0922	1.1620	1.2131	1.2686	1.3519
自然増加率 2010	1.1559	0.0668	1.0534	1.1090	1.1510	1.1999	1.2706

表 3-4 環境収容力、目撃係数、糞塊係数、狩猟捕獲率、有害捕獲率の推定値の要約

変数	平均	標準偏差	5 %点	25 %点	50 %点	75 %点	95 %点
環境収容力	220.8	178.6	89.90	120.2	164.4	251.6	538.0
糞塊係数	0.7710	0.1740	0.4890	0.6530	0.7670	0.8870	1.0610
目撃係数(2001 以前)	0.1330	0.0329	0.0815	0.1100	0.1310	0.1540	0.1900
目撃係数(2002 以降)	0.0837	0.0193	0.0526	0.0705	0.0831	0.0966	0.1160
狩猟捕獲率(2009 以前)	0.0777	0.0174	0.0492	0.0660	0.0774	0.0893	0.1070
狩猟捕獲率(2010 以降)	0.1780	0.0432	0.1100	0.1480	0.1760	0.2060	0.2530
有害捕獲率(2009 以前)	0.0406	0.0101	0.0249	0.0337	0.0400	0.0468	0.0581

表 3-5 個体数の将来予測 A: 毎年 30000 頭捕獲した場合 B: 毎年 35000 頭捕獲した場合
C: 毎年 40000 頭捕獲した場合

変数	平均	標準偏差	5 %点	25 %点	50 %点	75 %点	95 %点
個体数_A2011	138642	40143	90633	111596	130803	156537	212491
個体数_A2012	127982	43096	74915	98799	120222	147956	206610
個体数_A2013	120199	48563	57931	86952	112789	143806	209030
個体数_A2014	111635	56447	36992	72103	103308	140308	214840
個体数_A2015	102339	66419	12656	54457	92582	137102	224472
個体数_A2016	93238	77173	0	33966	79649	133995	236599
個体数_A2017	85620	87851	0	9790	64966	130794	251445
個体数_A2018	80294	98514	0	0	47590	127113	270618
個体数_B2011	138642	40143	90633	111596	130803	156537	212491
個体数_B2012	127982	43096	74915	98799	120222	147956	206610
個体数_B2013	120199	48563	57931	86952	112789	143806	209030
個体数_B2014	106643	56433	31992	67103	98308	135308	209840
個体数_B2015	91965	65969	1916	43776	81811	126377	213957
個体数_B2016	78049	74943	0	16330	62125	116739	220497
個体数_B2017	67064	82463	0	0	39139	105893	228710
個体数_B2018	59217	89725	0	0	12114	92823	239895
個体数_C2011	138642	40143	90633	111596	130803	156537	212491
個体数_C2012	127982	43096	74915	98799	120222	147956	206610
個体数_C2013	120199	48563	57931	86952	112789	143806	209030
個体数_C2014	101659	56402	26992	62103	93308	130308	204840
個体数_C2015	81854	65203	0	32909	71083	115543	203158
個体数_C2016	64254	71636	0	0	44359	99441	203684
個体数_C2017	51236	75868	0	0	13385	80004	204035
個体数_C2018	42631	79801	0	0	0	57610	207661

表 3-6 増加個体数の将来予測 A: 毎年 30000 頭捕獲した場合 B: 毎年 35000 頭捕獲した場合 C: 毎年 40000 頭捕獲した場合

変数	平均	標準偏差	5 %点	25 %点	50 %点	75 %点	95 %点
増加個体数_A2011	23340	9266	9443	17309	22650	28699	39174
増加個体数_A2012	22217	10202	7805	15379	21062	27828	40264
増加個体数_A2013	21427	11511	6023	13577	19754	27443	42003
増加個体数_A2014	20465	13118	3836	11308	18233	27006	43951
増加個体数_A2015	19301	15022	1147	8644	16399	26582	46013
増加個体数_A2016	18022	17076	0	5318	14340	26058	48414
増加個体数_A2017	16820	19095	0	1503	11886	25431	50817
増加個体数_A2018	15855	20970	0	0	8752	24799	53446
増加個体数_B2011	23340	9266	9443	17309	22650	28699	39174
増加個体数_B2012	22217	10202	7805	15379	21062	27828	40264
増加個体数_B2013	21427	11511	6023	13577	19754	27443	42003
増加個体数_B2014	19736	13025	3337	10584	17438	26242	43209
増加個体数_B2015	17706	14837	78	6945	14733	24905	44317
増加個体数_B2016	15570	16669	0	2543	11482	23266	45626
増加個体数_B2017	13724	18264	0	0	7389	21210	47348
増加個体数_B2018	12267	19678	0	0	2372	18918	48745
増加個体数_C2011	23340	9266	9443	17309	22650	28699	39174
増加個体数_C2012	22217	10202	7805	15379	21062	27828	40264
増加個体数_C2013	21427	11511	6023	13577	19754	27443	42003
増加個体数_C2014	18993	12935	2849	9867	16653	25431	42323
増加個体数_C2015	16087	14627	0	5218	12966	23042	42644
増加個体数_C2016	13218	16103	0	0	8356	20192	43157
増加個体数_C2017	10897	17201	0	0	2514	16724	43580
増加個体数_C2018	9225	18102	0	0	0	12140	44024

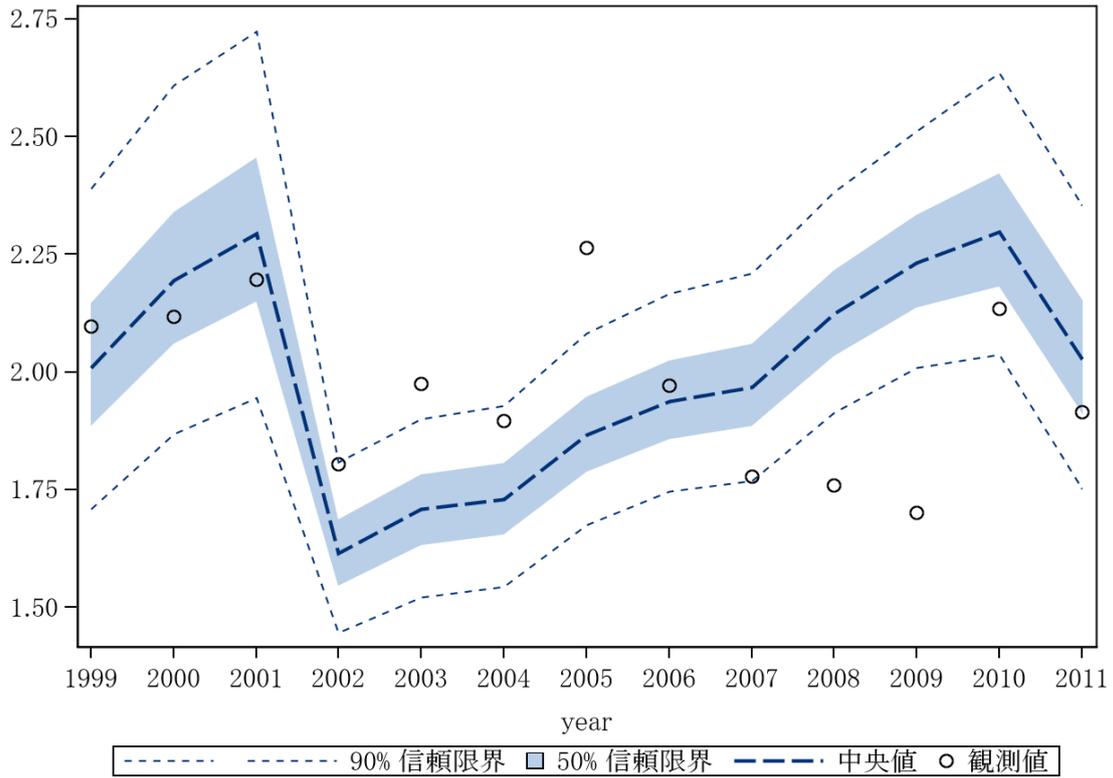


図 2 - 1 目撃効率の観測値と期待値との関係
中央値と 50%信頼限界、90%信頼限界を示す

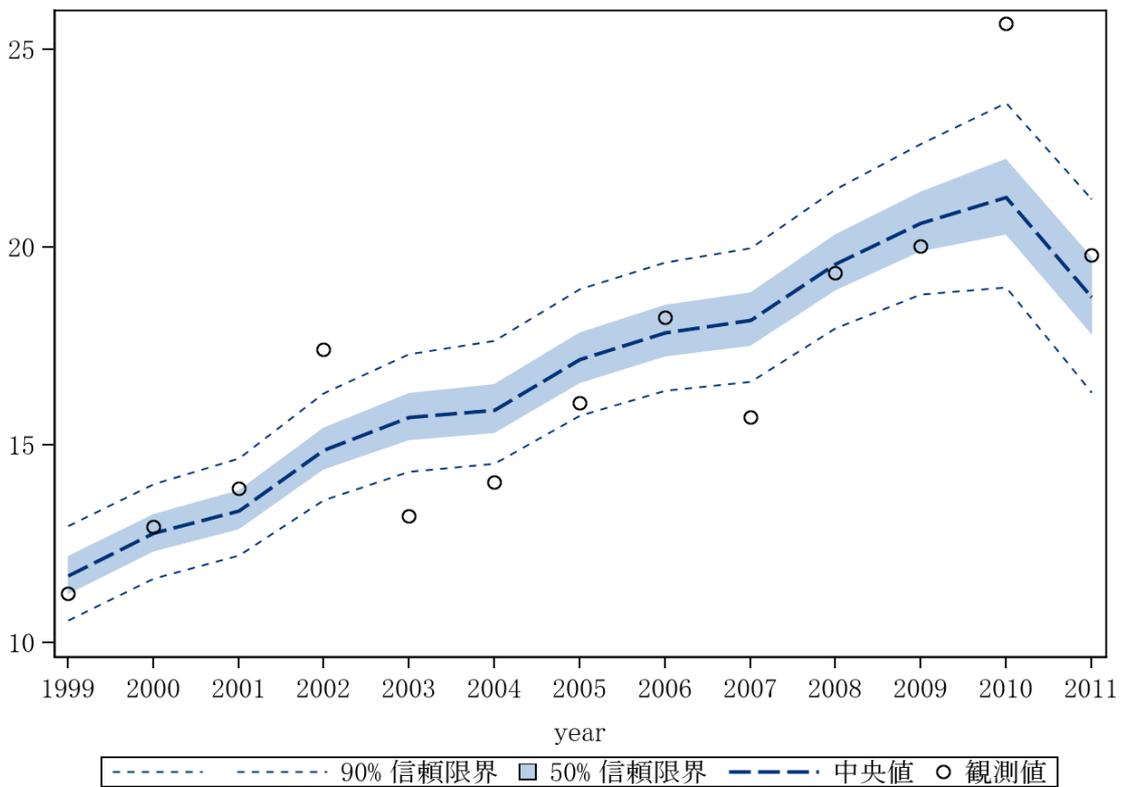


図 2 - 2 糞塊密度の観測値と期待値との関係
中央値と 50%信頼限界、90%信頼限界を示す

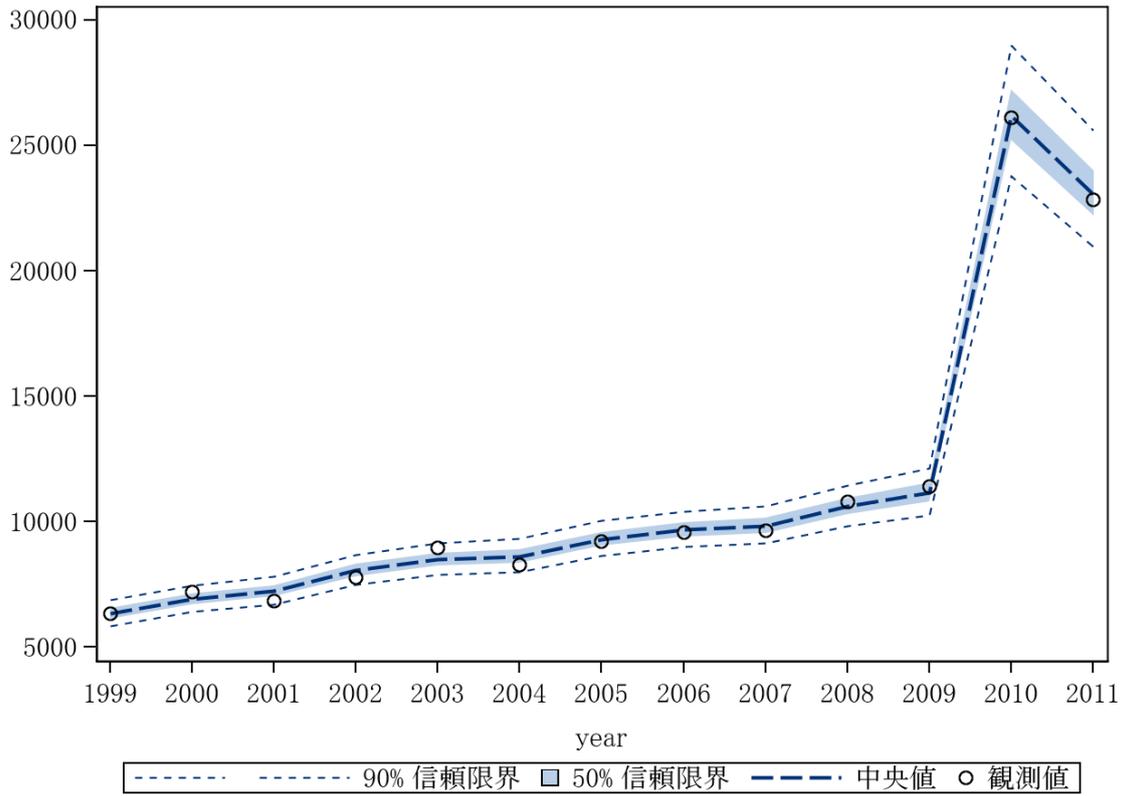


図 2-3 狩猟捕獲数の観測値と期待値との関係
中央値と 50%信頼限界、90%信頼限界を示す

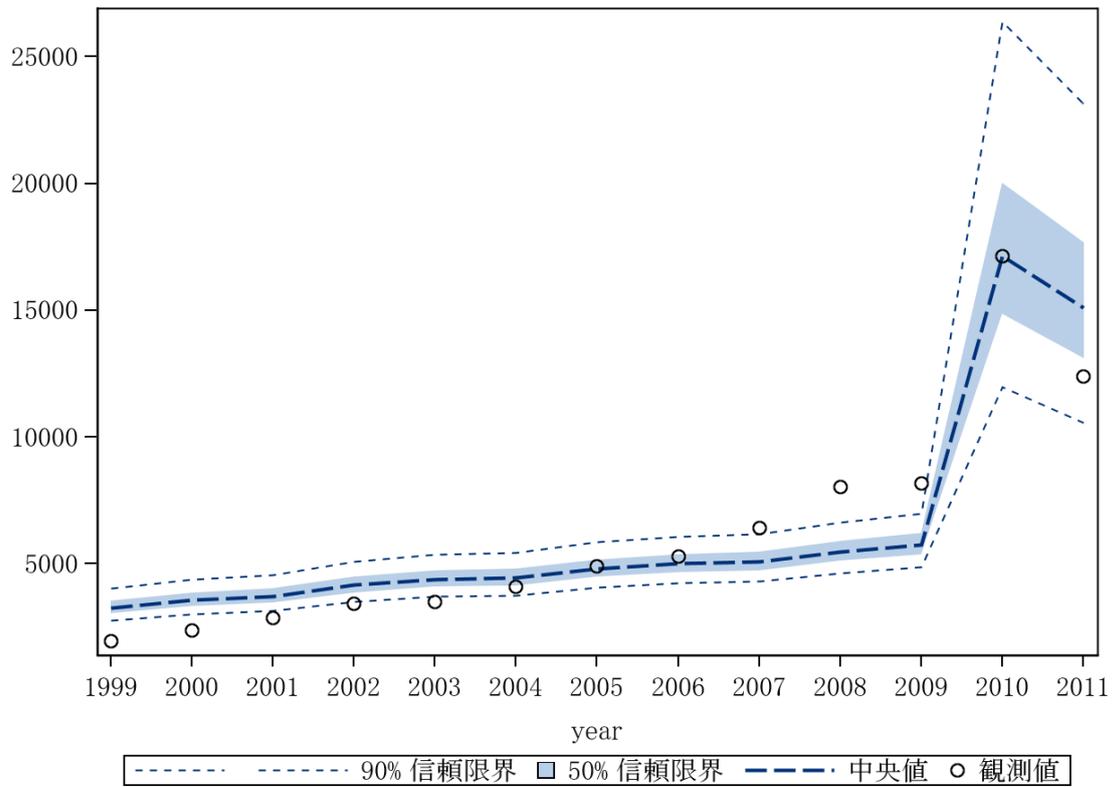


図 2-4 有害捕獲数の観測値と期待値との関係
中央値と 50%信頼限界、90%信頼限界を示す

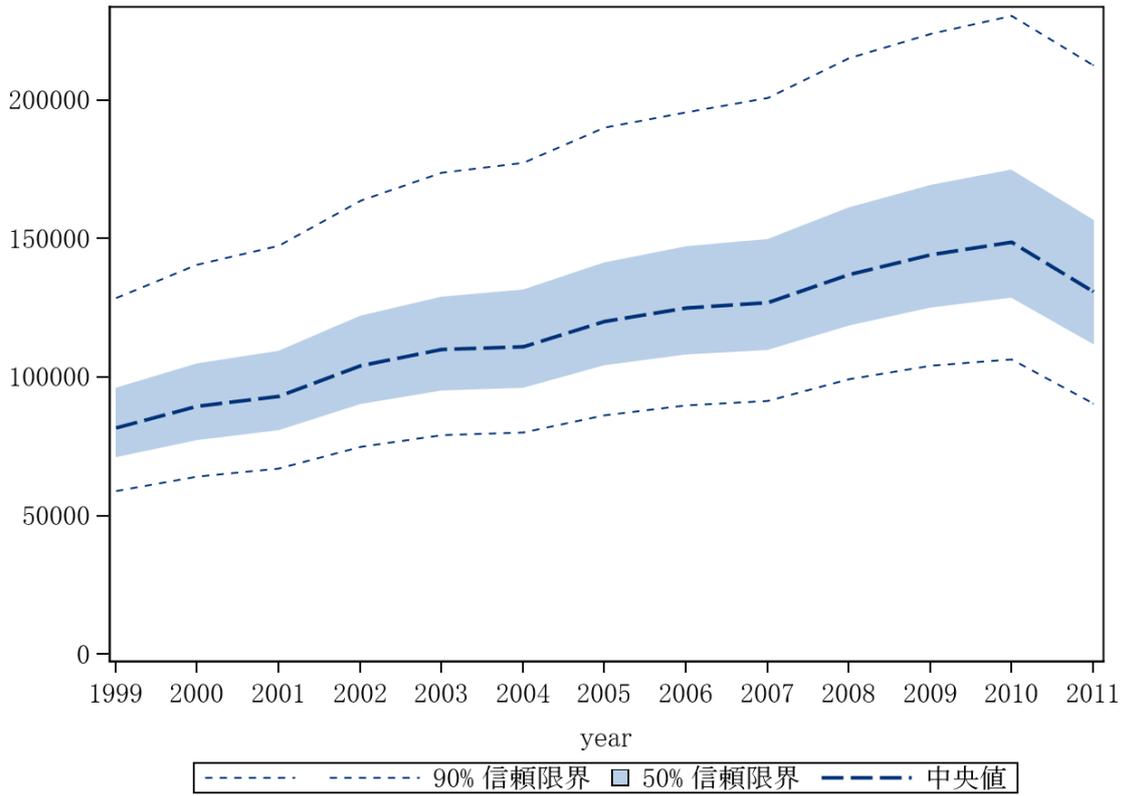


図3 兵庫県本州部のニホンジカの推定生息個体数

中央値と 50%信頼限界、90%信頼限界を示す

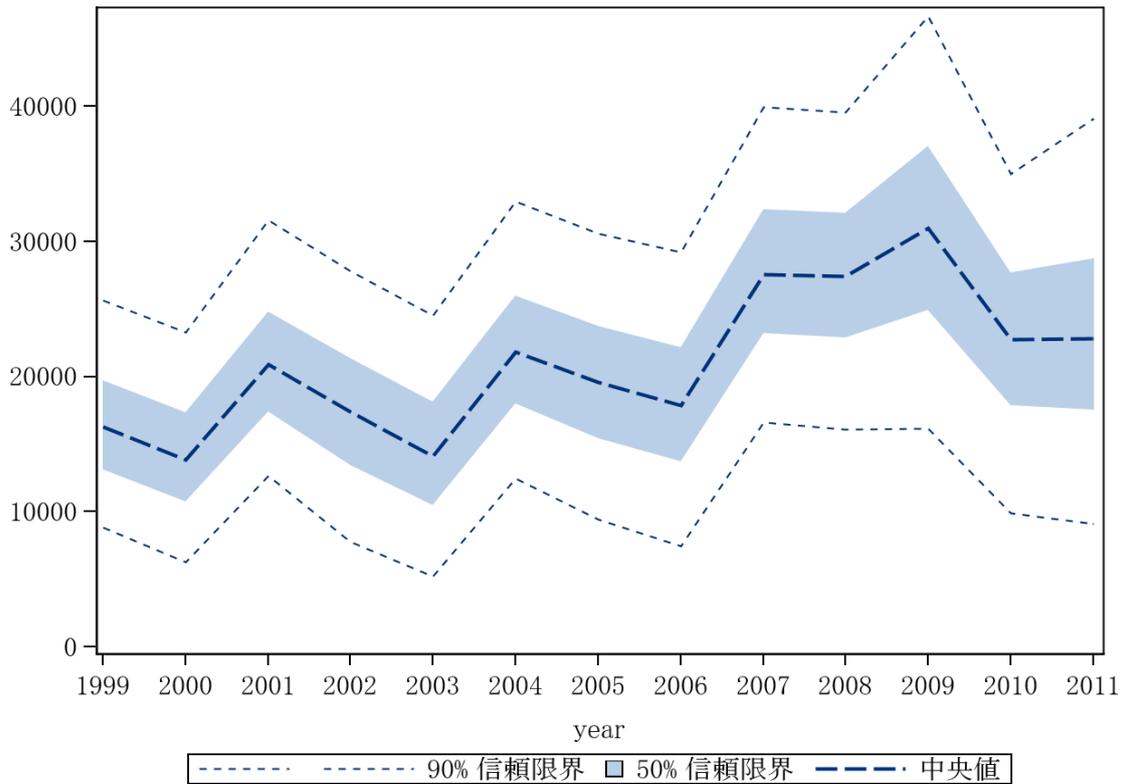


図4 兵庫県本州部のニホンジカの推定増加個体数

中央値と 50%信頼限界、90%信頼限界を示す

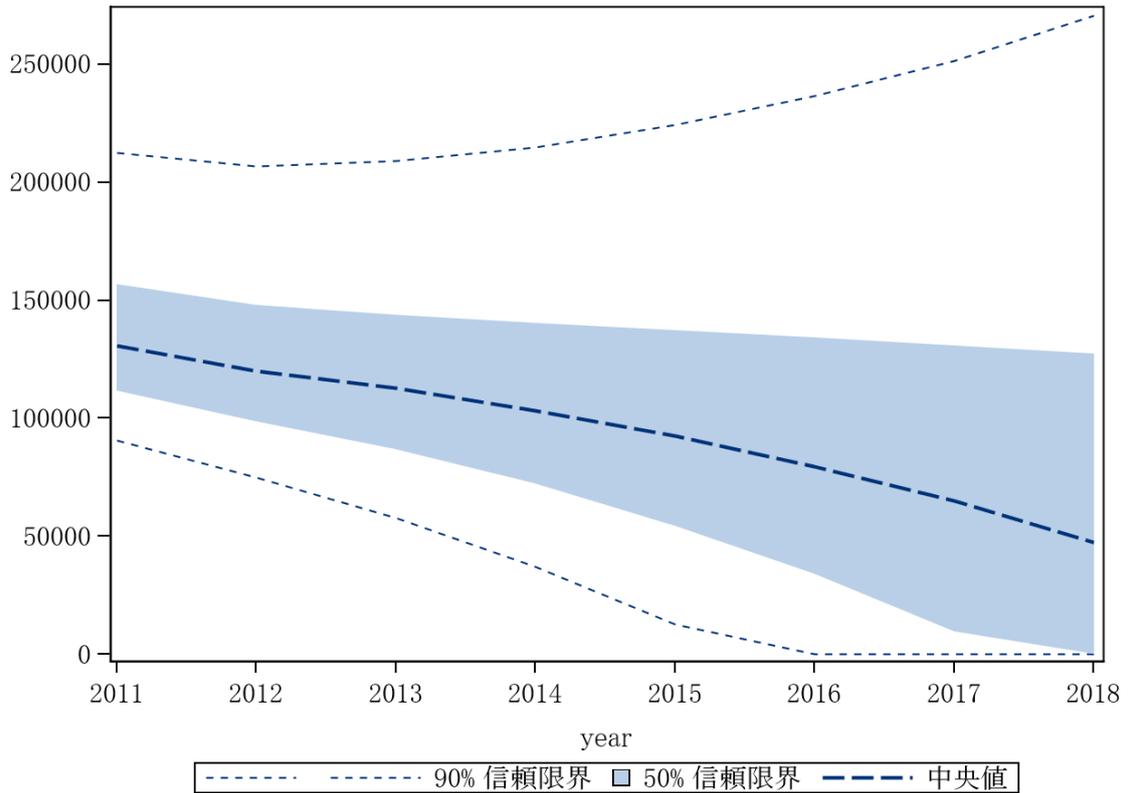


図 5 - 1 兵庫県本州部の個体数の将来予測（毎年 30,000 頭捕獲した場合）
中央値と 50%信頼限界、90%信頼限界を示す

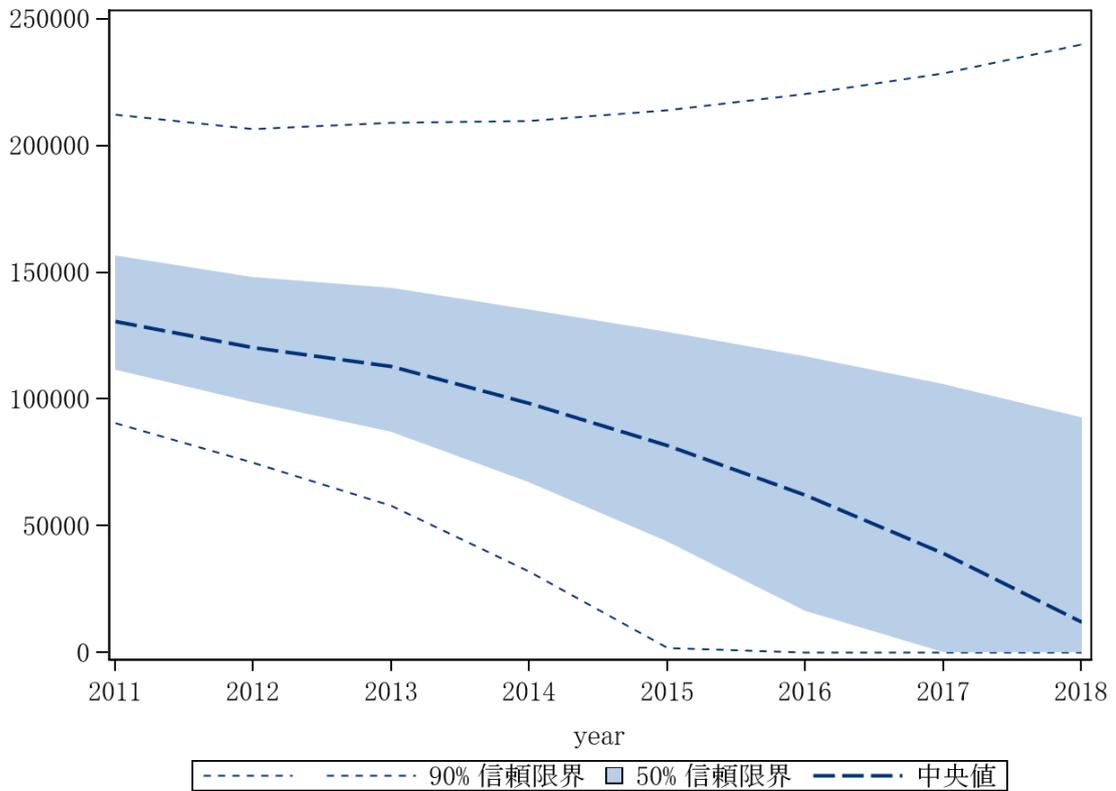


図 5 - 2 兵庫県本州部の個体数の将来予測（毎年 35,000 頭捕獲した場合）
中央値と 50%信頼限界、90%信頼限界を示す

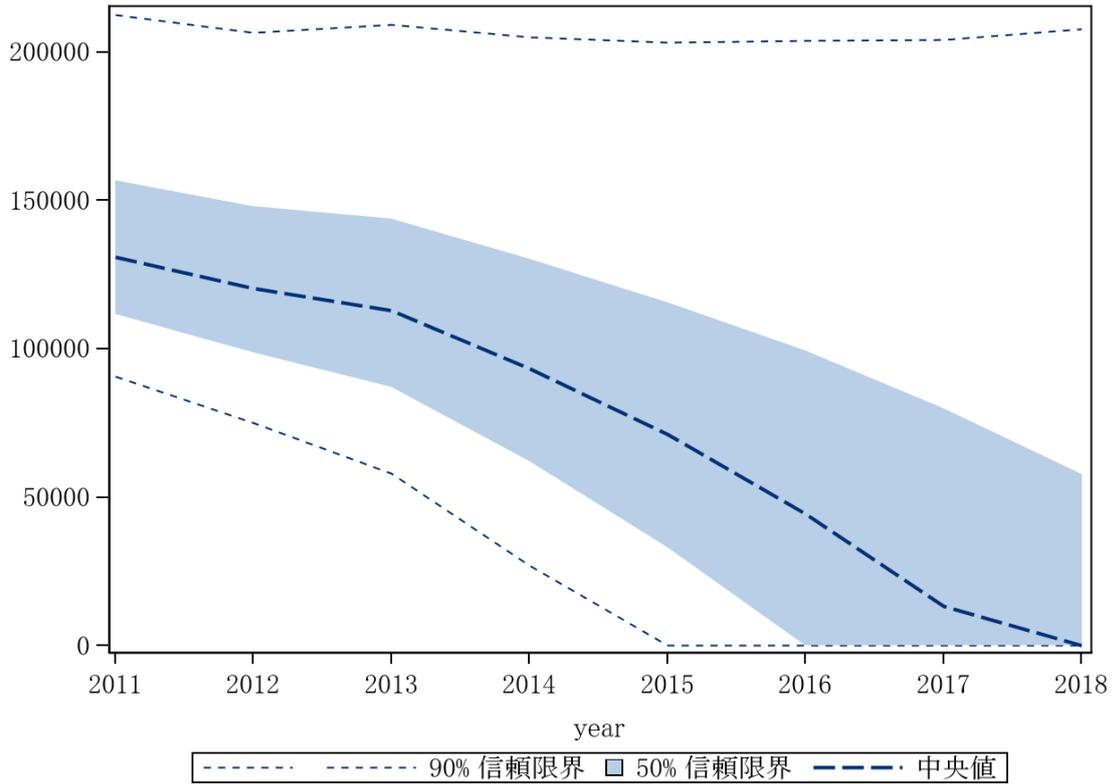


図5-3 兵庫県本州部の個体数の将来予測（毎年40,000頭捕獲した場合）
中央値と50%信頼限界、90%信頼限界を示す

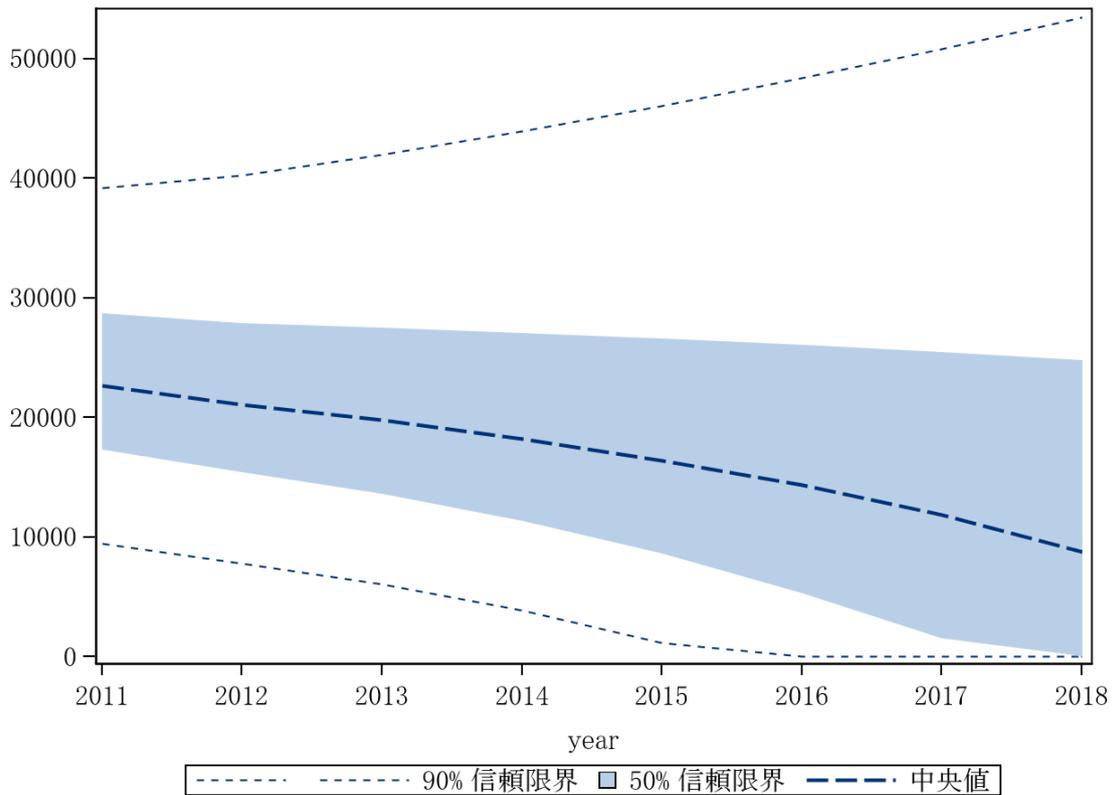


図6-1 兵庫県本州部の増加個体数の将来予測（毎年30,000頭捕獲した場合）
中央値と50%信頼限界、90%信頼限界を示す

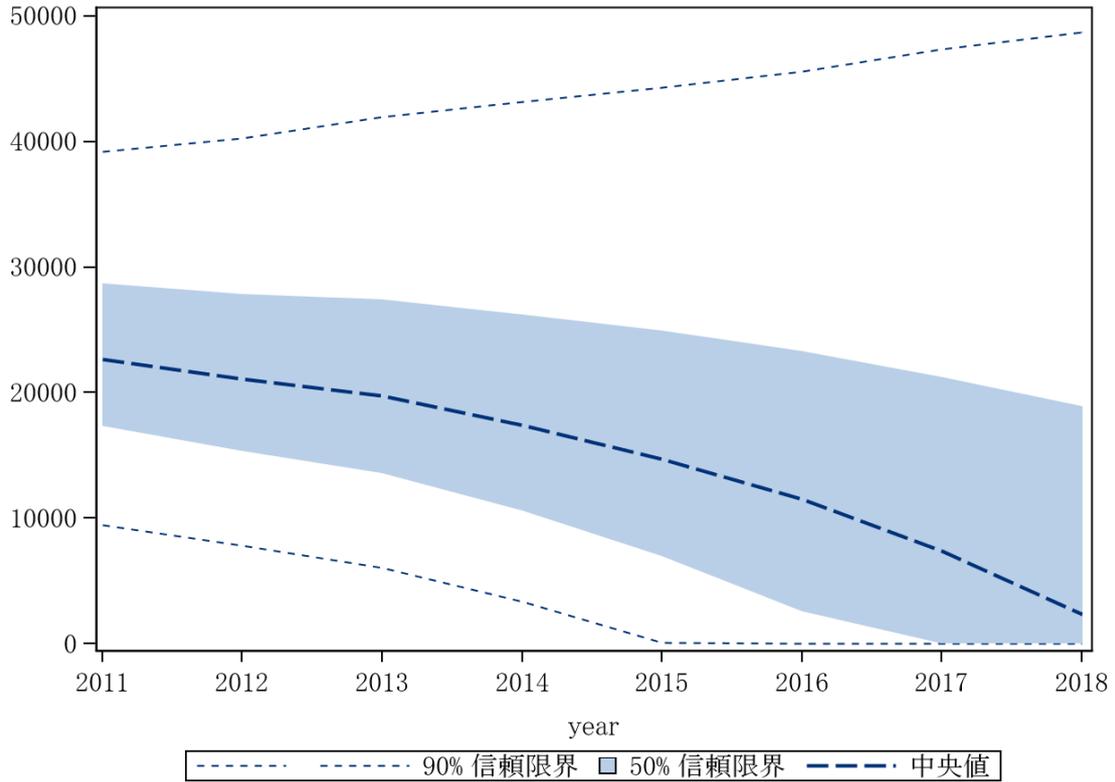


図6-2 兵庫県本州部の増加個体数の将来予測（毎年35,000頭捕獲した場合）
中央値と50%信頼限界、90%信頼限界を示す

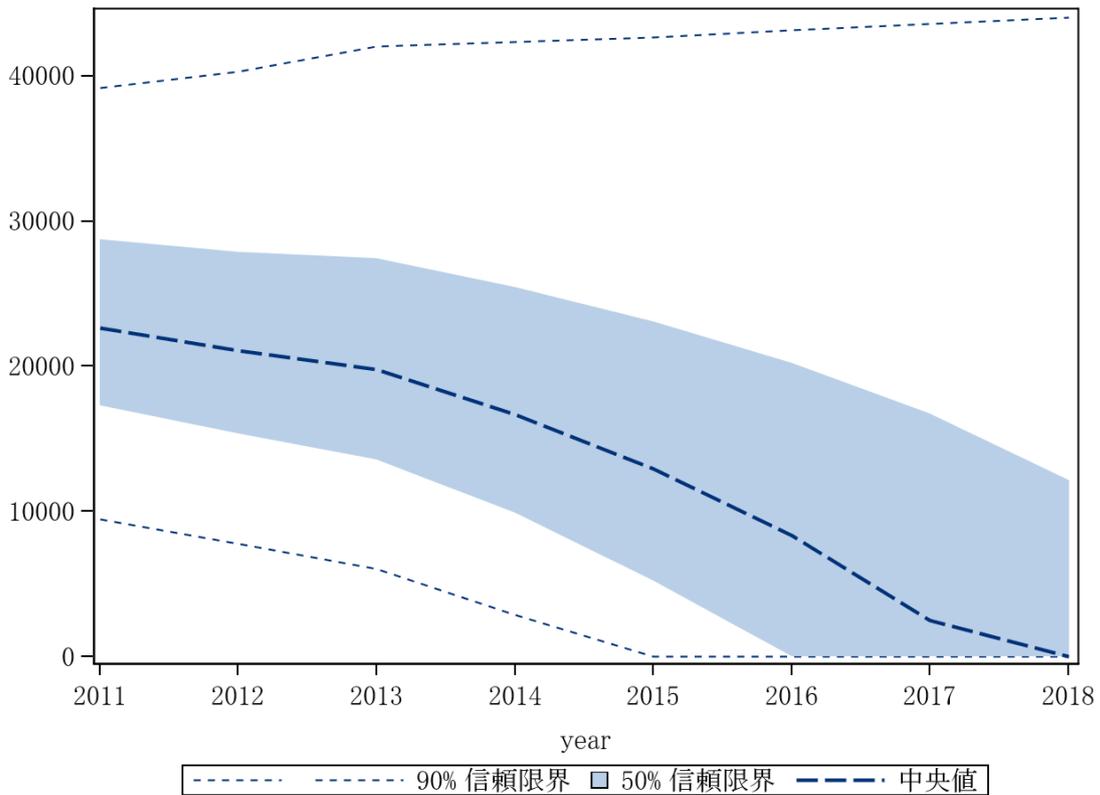


図6-3 兵庫県本州部の増加個体数の将来予測（毎年40,000頭捕獲した場合）
中央値と50%信頼限界、90%信頼限界を示す

謝辞

本研究の一部は、環境省の環境研究総合推進費（D-1003）により実施された。

引用文献

- Geweke J 1992 Evaluating the Accuracy of Sampling-Based Approaches to the Calculation of Posterior Moments. In Bayesian Statistics 4 (Bernardo JM, Berger JO, Dawid AP, Smith AFM, eds), pp.169-193, Oxford Univ Press, Oxford.
- Gilks WR, Richardson S, Spiegelhalter D 1996 Markov Chain Monte Carlo in Practice. Chapman & Hall/CRC, New York, USA, 512pp.
- Itoh T 1986 Population trend of Sika deer on Kinkazan Island. Honyurui Kagaku (Mammalian Science) 53: 29-31
- Kaji K, Okada H, Yamanaka M, Matsuda H, Yabe T 2004 Irruption of a Colonizing Sika Deer Population Wildlife Management 68: 889-899
- 環境省自然環境局生物多様性センター 2011 平成 22 年度自然環境保全基礎調査特定哺乳類生息状況調査及び調査体制構築検討業務報告書. pp.185-195
- Kass RE, Carlin BP, Gelman A, Neal RM 1998 Markov Chain Monte Carlo in Practice: A Roundtable Discussion. The American Statistician 52: 93-100
- Roberts GO, Gelman A, Gilks WR 1997 Weak convergence and optimal scaling of random walk Metropolis algorithms. Annals of Applied Probability 7: 110-120
- 坂田宏志, 岸本康誉, 関香菜子 2012 ニホンジカの個体群動態の推定と将来予測 (兵庫県本州部 2011 年) 兵庫ワイルドライフレポート 1: 1-16
- SAS Institute Inc. 2011 SAS/STAT® 9.3 User's Guide. SAS Institute Inc., Cary, NC.